

Caracterización estructural del sistema de *ledges* y clavos mineralizados del sector Cachinalito, mina El Guanaco, región de Antofagasta, Chile

*Sebastián Jovic^{1,2}, Gerardo Páez^{1,2}, Matías Galina¹, Diego Guido^{1,2},
Conrado Permuy Vidal^{1,2}, Luciano López^{1,2}, Stabro Kasaneva³

¹ Instituto de Recursos Minerales, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, Calle 64 y Calle 120, La Plata 1900, Buenos Aires, Argentina.

sjovic@inremi.unlp.edu.ar; gerardo.paez.unlp@gmail.com; matiasgalina@gmail.com; diegoguido@yahoo.com; conradopermuyvidal@gmail.com; lopez_lucho@yahoo.com.ar

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Godoy Cruz 2290, Buenos Aires, Argentina.

³ Austral Gold Ltd., 14 de Febrero 2065, oficina 1103, Antofagasta, Chile.

stabro.kasaneva@australgold.com

* Autor de correspondencia: *sjovic@inremi.unlp.edu.ar; sebastianjovic@gmail.com*

RESUMEN. El yacimiento de oro El Guanaco es un depósito epitermal de alta sulfuración ubicado en la franja metalogénica paleocena-eocena inferior, en la región de Antofagasta, norte de Chile, 215 km al SE de la ciudad de Antofagasta. El depósito está formado por un sistema de *ledges* subparalelos constituidos por *vuggy silica* y en menor medida vetas de cuarzo y enargita. El sector Cachinalito, ubicado en la parte noroeste del yacimiento, está conformado por numerosos *ledges* que en conjunto presentan una morfología lineal discontinua, de orientación general ENE-OSO y que cambian abruptamente de orientación, espesor, longitud e inclinación, a pocos metros de su corrida. El análisis de la distribución de leyes, el mapeo de detalle realizado a escala del depósito y la identificación de estructuras individuales (*ledges*) muestra que uno de los factores más importantes en la formación del depósito es el control estructural. El estudio estructural hecho a escala del depósito y del sistema de *ledges* permitió visualizar las distintas segmentaciones dentro de una estructura general, teniendo en cuenta los tamaños, la continuidad horizontal y vertical, y el grado de conexión entre segmentos de distintas orientaciones, así como determinar las orientaciones con mayor desarrollo de estructuras mineralizadas. La distribución de las leyes permitió caracterizar e identificar los clavos mineralizados dentro de los *ledges*, interpretar las posibles vías de ascenso de los fluidos mineralizadores, además de dimensionar y separar los sectores mineralizados de alta y baja ley. Este tipo de análisis e identificación de los clavos mineralizados representa una importante herramienta de exploración y ayuda a orientar mejor los sondeos de exploración y/o de producción en este tipo de depósitos.

Palabras Clave: Control estructural, Ledges, Clavos mineralizados, Yacimiento epitermal, Alta sulfuración, El Guanaco, Chile.

ABSTRACT. Structural characterization of ledge system and ore shoots from Cachinalito sector, El Guanaco mine, Antofagasta region, Chile. The high sulfidation epithermal gold deposit El Guanaco is located in the Palaeocene-Lower Eocene metallogenic belt in the Antofagasta Region, northern Chile, 215 km SE of Antofagasta city. The deposit is characterized by a system of sub-parallel ledges made of vuggy silica and quartz enargite veins. In the Cachinalito sector, on the north western side of the ore deposit, the ledges system has a discontinuous linear morphology, with a general ENE-OSO orientation, consisting of many ledges segments that change abruptly in orientation, thickness, length and inclination. Grade analysis distribution, detailed mapping at deposit scale, and identification of individual structures (ledges) shows that one of the key factors in deposit genesis is the structural control. The structural analysis

allowed visualizing the different segmentations within a general structure, considering the sizes, horizontal and vertical continuity, degree of connection between ledge segments of different orientations, as well as determining the orientations with greater development of mineralized structures. The distribution of the grades allowed to characterize and identify the ore shoots within the ledges, and to interpret the ascending pathways of the mineralizing fluids by dimensioning and separating the high- and low-grade mineralized sectors. This type of analysis and identification represents an important exploration tool and helps exploration and / or production drilling in this type of deposit.

Keywords: Structural control, Ledges, Ore shoots, High sulfidation, Epithermal Deposit, El Guanaco, Chile.

1. Introducción

El yacimiento de oro El Guanaco es un depósito epitermal de alta sulfuración (Puig *et al.*, 1988; Galina, 2019; Arribas, 1995; Hedenquist *et al.*, 2000) que se ubica en el norte de Chile, a 215 km al SE de la ciudad de Antofagasta a una altitud 2.700 m y forma parte de la franja metalogénica del Paleoceno-Eoceno inferior (Fig. 1). El depósito fue descubierto en 1878 (Egaña, 1978) y ha tenido una producción total mínima documentada de 1,3 millones de onzas de oro hasta la fecha, aunque en base a datos históricos inéditos se estima que podría haber alcanzado 2,6 millones de onzas de oro (Galina *et al.*, 2014). Actualmente es un depósito con una ley media de 5 g/t de Au cuya recuperación metalúrgica se ve favorecida por la oxidación supérgena de la mena hipógena.

El yacimiento se caracteriza por la presencia de sistemas de *ledges* subparalelos formados por *vuggy silica* y, en menor medida, por vetas, vetillas y *stockworks* de enargita, cuarzo y baritina, ubicados en corredores estructurales con una orientación general ENE. Los *ledges* son estructuras silicificadas emplazadas a lo largo de fallas, fracturas o fisuras en las cuales las rocas involucradas presentan una textura residual silícea, caracterizadas por la lixiviación total de los minerales constituyentes de la roca con reemplazo y recristalización de cuarzo macizo (*vuggy silica*), lixiviación que es originada por soluciones hidrotermales de bajo pH. Estas estructuras presentan una morfología irregular, segmentos muy discontinuos y semilineales a lo largo de su corrida (Vikre, 1989). De acuerdo con la distribución areal de los *ledges*, el yacimiento El Guanaco puede ser dividido en 4 sectores, de los cuales Cachinalito ocupa el sector noroccidental (Fig. 2).

Con el fin de aportar nuevos criterios para la exploración de este depósito, los objetivos del presente trabajo son determinar y caracterizar lo siguiente:

1) localización, distribución y morfología de los *ledges* y sus clavos mineralizados, 2) continuidad horizontal y vertical de los clavos mineralizados y grado de conexión entre segmentos mineralizados, 3) orientaciones con importante permeabilidad original para identificar las zonas de mayor circulación de fluidos hidrotermales, y finalmente 4) se propone un modelo cinemático sinmineralización del depósito.

2. Yacimiento de oro El Guanaco

2.1. Geología

La geología regional del área en la cual se ubica el yacimiento El Guanaco se caracteriza por la presencia dominante de rocas volcánicas. Matthews y Cornejo (2006) y Espinoza *et al.* (2011) agrupan, en base a su edad, las rocas volcánicas en 3 ciclos o eventos: 1) un ciclo del Cretácico Superior que agrupa las rocas perteneciente a la Formación Augusta Victoria (García, 1967), dominado por rocas piroclásticas ácidas y lavas andesíticas subordinadas; 2) un ciclo volcánico del Paleoceno-Eoceno constituido por lavas de composición principalmente intermedia, con flujos piroclásticos subordinados, asignadas a la Formación Chile-Alemania (Chong, 1973); y 3) un tercer ciclo de edad del Eoceno superior y escaso desarrollo, que incluye los Basaltos de Catalina (Espinoza *et al.*, 2011), que corresponden a coladas basálticas. Dentro del área de estudio, estos ciclos se disponen formando tres franjas de orientación meridiana que se hacen progresivamente más jóvenes hacia el oeste. Desde un punto de vista metalogenético, la unidad formacional más relevante para el yacimiento de oro El Guanaco corresponde a la Formación Chile-Alemania (Paleoceno-Eoceno inferior, 56-52 Ma.; Espinoza *et al.*, 2011), cuyas rocas hospedan más del 90% de la mineralización allí presente. En el Eoceno inferior a medio (48-45 Ma.), se emplazaron pequeños pórfidos andesíticos a

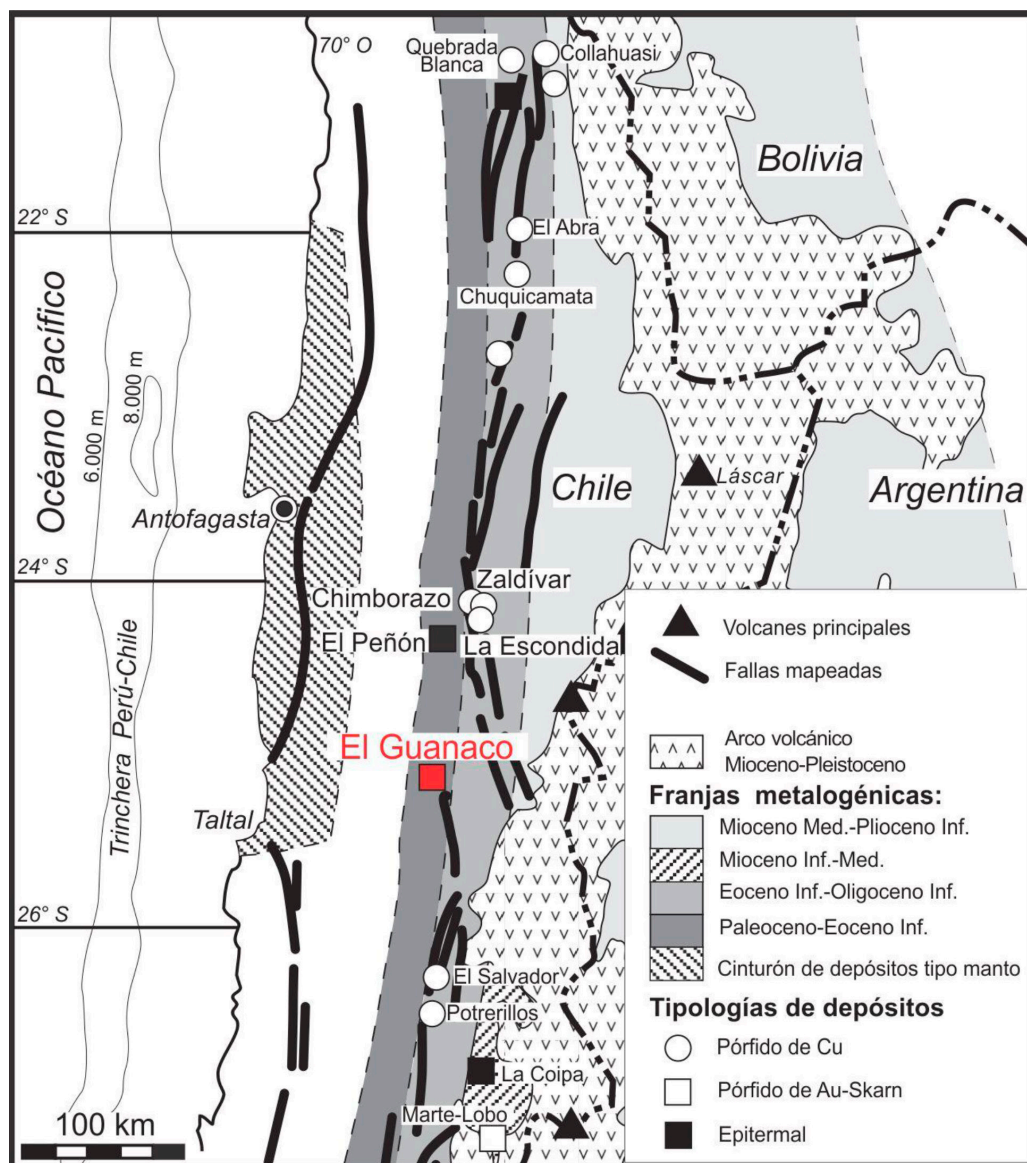


Fig. 1. El yacimiento de oro El Guanaco se localiza 215 km al sureste de la ciudad de Antofagasta y forma parte de la franja metalogénica del Paleoceno-Eoceno Inferior compuesta por yacimientos tipo pórfido de cobre y epitermales de metales preciosos. Se señalan los grandes sistemas estructurales del norte de Chile, Sistemas de Fallas Atacama y de Domeyko, a la izquierda y derecha respectivamente (Modificado de Richards, 2003).

dacíticos en torno a los cuales se distribuyen extensas zonas de alteración hidrotermal, formando *lithocaps* silíceos con alunita, ubicados en la parte superior de los sistemas mineralizados. Dataciones K-Ar y $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ realizadas en alunitas hipógenas (Espinoza *et al.*, 2011) indican una edad entre 49 y 43 Ma para la formación de estos *lithocaps*.

Los *ledges* del sector Cachinalito cortan una secuencia de rocas volcánicas, perteneciente a la Formación Chile-Alemania, que se inicia con dacitas porfíricas, con fenocristales de plagioclasas, biotita, anfíbol y en menor cantidad piroxeno y cuarzo, contenidos en una masa fundamental afanítica, denominada Pórfido Cachinalito. Los datos de sondajes

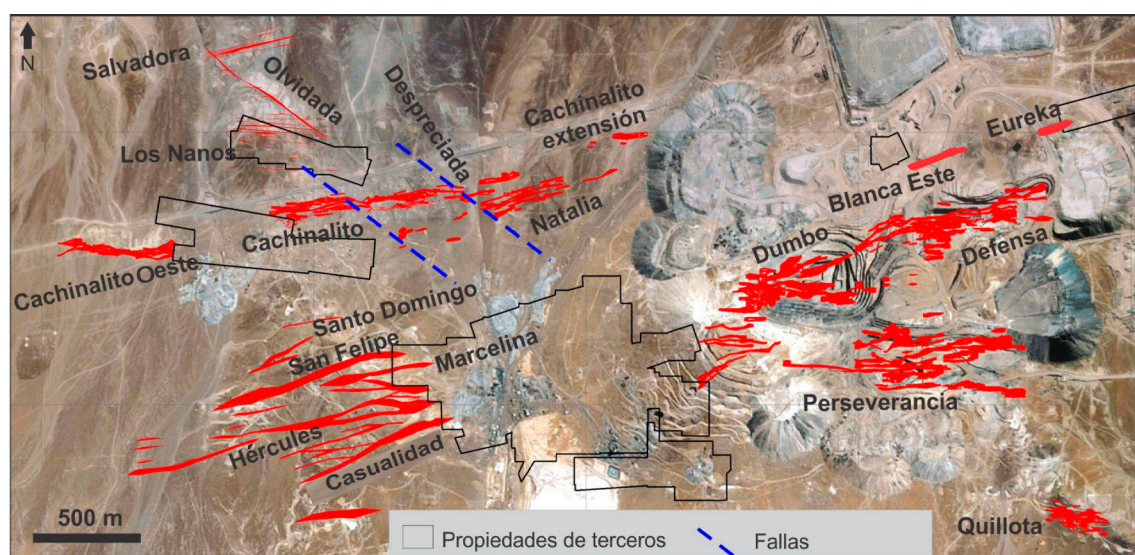


Fig 2. Mapa de distribución de *ledges* mineralizados en superficie y proyección de los *ledges* no aflorantes, que en conjunto constituyen el yacimiento de oro El Guanaco. En rojo *ledges* mineralizados, las líneas cortadas azules representan fallas posmineralización.

e interior de mina permiten establecer que se encuentra por debajo de depósitos piroclásticos que se inician con 10 m de brechas piroclásticas líticas, con fragmentos de lavas afaníticas y del Pórfido Cachinalito contenidos en una matriz fina, piroclástica, de coloración rojiza. Por encima se disponen depósitos de ignimbritas que se caracterizan por una granulometría fina y un aspecto general “arenoso”, con fragmentos pumíceos irregulares sin evidencias de soldamiento, y por la presencia de niveles basales de brechas líticas, y/o de niveles lenticulares de concentración de pómez o fragmentos líticos.

2.2. Mineralización

Los depósitos epitermales de alta sulfuración (*high sulfidation*) muestran un amplio espectro de estilos o morfologías de depósito, que incluyen vetas, *ledges*, cuerpos de brechas hidrotermales, *stockworks*, diseminaciones y reemplazos (Arribas, 1995; Hedenquist *et al.*, 2000).

El depósito epitermal de oro El Guanaco está formado por sistemas de *ledges* subparalelos, constituidos por sílice oquerosa (*vuggy silica*) y, en menor medida, vetas, vetillas y *stockworks* (sistemas de vetillas entrelazadas y diseminación) de cuarzo y enargita de orientación ENE-OSO (Figs. 2 y 3A).

Los *ledges* y vetas están asociados a corredores o trenes de fallas y fracturas regionales de orientación ENE-OSO y distritales de orientación E-O que fueron contemporáneas con la actividad hidrotermal que dio origen al yacimiento. Posteriormente el yacimiento fue afectado por fallamiento posmineralización de orientación NO-SE (Guido *et al.*, 2014; Galina, 2019). Con base en relaciones de corte se interpretó que los *ledges* y la mineralización de los mismos, que constituyen el yacimiento El Guanaco fueron formados a través de un proceso continuo constituido por 4 pulsos hidrotermales discretos (Guido *et al.*, 2014; Galina, 2019). El pulso 1 es el más extendido y es estéril, durante su formación la estructura adquiere la permeabilidad original que posibilita la posterior circulación de los fluidos hidrotermales y la precipitación y deposición de los minerales de mena y ganga durante los pulsos posteriores. Los pulsos 2, 3 y 4 son los responsables de la mineralización (eventos hidrotermales mineralizantes), mientras que el pulso 5 corresponde a la oxidación supérgena de los minerales hipógenos formados durante los pulsos anteriores. Aquí se describe cada uno de los pulsos, de más antiguo a más joven:

Pulso 1: da origen al núcleo de los *legdes*, compuesto exclusivamente por *vuggy silica*, sílice residual maciza, rutilo y diásporo residual con escasa

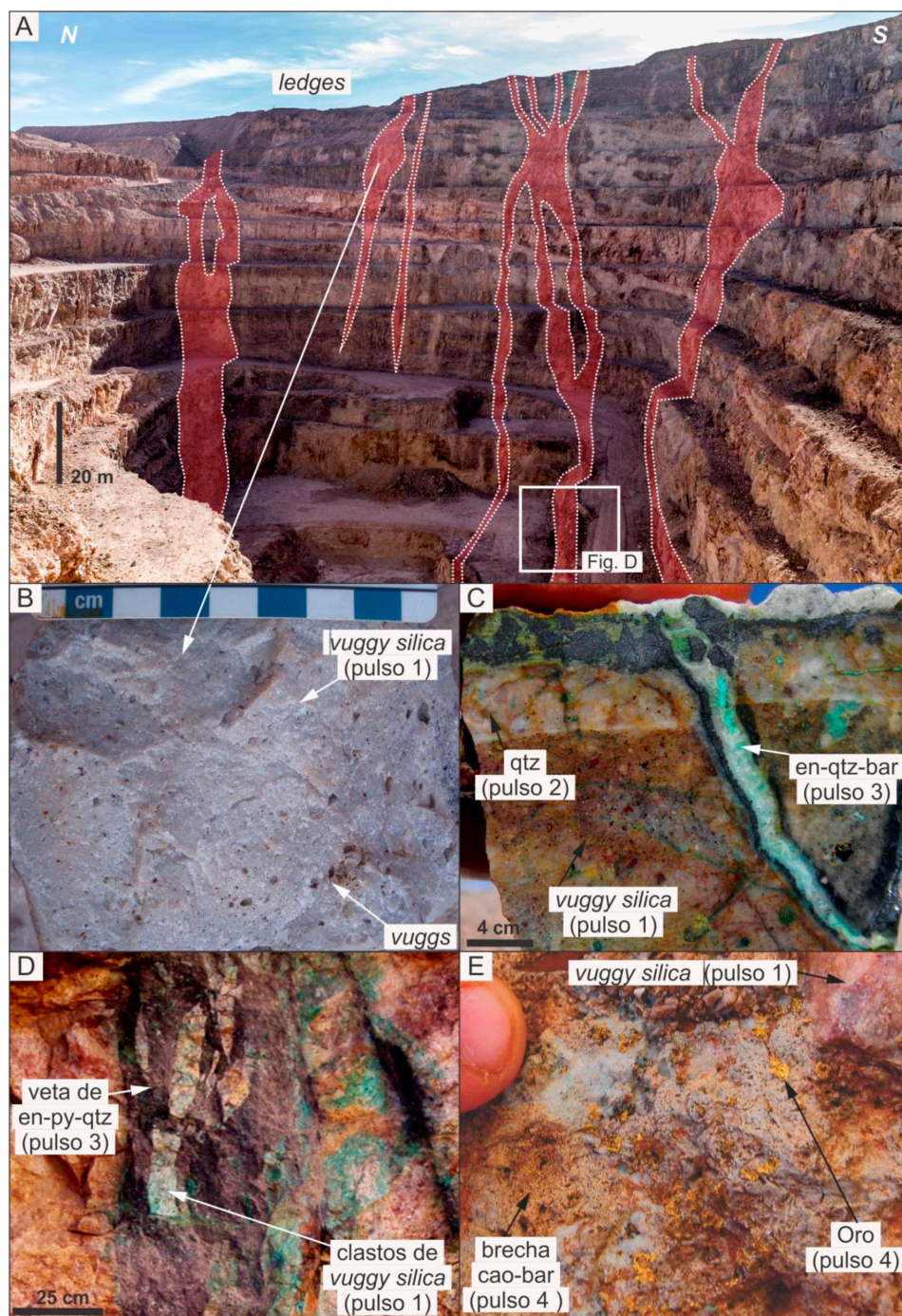


Fig. 3. **A.** Pared este del rajo Dumbo donde se observan *ledges* con distintas morfologías. **B.** Roca de caja afectada por lixiviación ácida originada durante el pulso 1 de la actividad hidrotermal (textura *vuggy silica*). **C.** Roca de caja afectada por lixiviación ácida del pulso 1 (textura *vuggy silica*), cortada por vetilla de cuarzo grueso del pulso 2 y ambos cortados por vetilla de enargita-cuarzo-baritina del pulso 3. **D.** Pulso 3 formado principalmente por veta de enargita con textura que contiene fragmentos de *vuggy silica* del pulso 1. **E.** Brecha de caolinita, cuarzo, cristales euhedrales de baritina y sílice masiva a modo de cemento (Pulso 4) con clastos de *vuggy silica* del pulso 1 y patinas de oro libre. **qtz:** cuarzo, **en:** enargita, **bar:** baritina, **cao:** caolinita (Modificado de Galina, 2019).

presencia de caolinita y alunita (Fig. 3B). Cada *ledge* presenta un halo de alteración que afecta a la roca de caja según el siguiente arreglo zonal: una zona interna, en contacto con el *ledge*, con alteración argílica avanzada compuesta por caolinita, alunita, natroalunita, dickita y pirofilita; una zona intermedia con alteración argílica compuesta por caolinita y pirita y, por último, una zona externa con alteración clorítica.

Pulso 2: este pulso origina la depositación de cuarzo grueso (mayor a 100 μm) dispuesto en vetillas con texturas en peine, que corta a los *ledges*, y rellenan oquedades en los *vuggy silica*, con texturas en cocarda, y presencia ocasional de calcedonia (Fig. 3C).

Pulso 3: produce formación de cuarzo fino (10 μm promedio) con textura en mosaico, al cual se asocia enargita tabular con cristales que van desde los pocos milímetros hasta más de 10 cm de largo (Fig. 3C y D), pirita arsenical, tetraedrita-tennantita, abundante baritina euhedral con cristales que van desde la decena de micrones hasta varios centímetros, y presencia ocasional de electrum libre en pátinas e inclusiones sólidas, con cristales <20 μm . Las zonas incluidas en esta etapa presentan concentraciones de Au >2 g/t y >700 g/t de Cu.

Pulso 4: este pulso se caracteriza por formar brechas hidrotermales de caolinita y sílice masiva, acompañadas en menor medida de baritina euhedral, así como baritina fina de aspecto “terroso” con Au nativo visible (Fig. 3E), óxidos de manganeso y con clastos de los pulsos anteriores incorporados.

Pulso 5: corresponde a la etapa de alteración supérgena que afectó a la mena hipógena. Está constituido por óxidos de hierro, jarosita, brochantita, atacamita, lavendulana y otros minerales oxidados con As y Cu.

3. Metodología

Este estudio corresponde a un análisis integral de los *ledges* del sector Cachinalito a partir de secciones en planta de los distintos niveles de la mina, secciones transversales, información geoquímica de canaletas y sondajes, datos y mapeos de interior mina y medición de planos de falla estriados, corrugados, *jogs* y otros indicadores cinemáticos. Se analizaron los mapeos de detalle de cada nivel en planta, diferenciando segmentos de *ledges* mineralizados de distintas orientaciones y generando puntos de toma de datos donde se midieron y analizaron variables como rumbo,

inclinación, longitud y espesor de los *ledges* (n=142). Los contenidos de oro de las muestras de *ledges* fueron determinados por ensayo a fuego y espectrometría de absorción atómica, con un límite de detección de 0,01 g/t. Basados en la geoquímica de canaletas de interior mina, se identificó la distribución de las zonas de alta ley dentro de los *ledges*, en intervalos de 2-5 g/t de Au y >5 g/t de Au, lo que permitió definir los clavos mineralizados. En estos sectores se separaron segmentos con distintas orientaciones y se midieron rumbo, inclinación, longitud y espesor (n=345). En las secciones transversales y los perfiles longitudinales se analizó la morfología de los *ledges* y su relación con el fallamiento y la mineralización. Se realizó un análisis de indicadores cinemáticos (planos de fallas, estriados, corrugados, *jogs*) tomando rumbo e inclinación de las estructuras mineralizadas y fallas, y la disposición e inclinaciones de las estrías sobre planos de fallas (raque) y de otros indicadores cinemáticos.

4. Sector Cachinalito

Varios sectores con grupos de *ledges* mineralizados del yacimiento de oro El Guanaco han sido explotados a cielo abierto, como Dumbo, Defensa, Perseverancia, Quillota, Blanca Estela, y Eureka (Fig. 2; Galina et al., 2014; Galina, 2019). Actualmente, la explotación está enfocada en el sector Cachinalito y se realiza en forma subterránea (Figs. 2 y 4A).

Este sector corresponde a un sistema de *ledges* subparalelos no aflorantes (sin presencia de vetas de enargita) de morfología lineal muy discontinua, con una orientación general ENE-OSO, pero con segmentación interna que muestra numerosos tramos con rumbos variables en su corrida (Figs. 4A y 5A). Se divide en 3 zonas según la orientación de los *ledges* (Figs. 4A y 5A): la oriental formada por Cachinalito Central Este (CCE) con segmentos de *ledges* principalmente N60°-N70° hasta N45°-N50°; la de Cachinalito Central (CC) caracterizada por *ledges* con una orientación N80°-N90°; y la occidental denominada Cachinalito Central Oeste (CCO) representada por segmentos de *ledges* de orientación N60°-N70° y en menor medida de orientación N110°-N120°.

La distribución de las leyes de Au sobre la sección longitudinal (N85° E) de Cachinalito (Fig. 4B), muestra una clara zonación vertical de las concentraciones auríferas por metro de potencia de *ledge*. Se aprecia como los valores superiores a

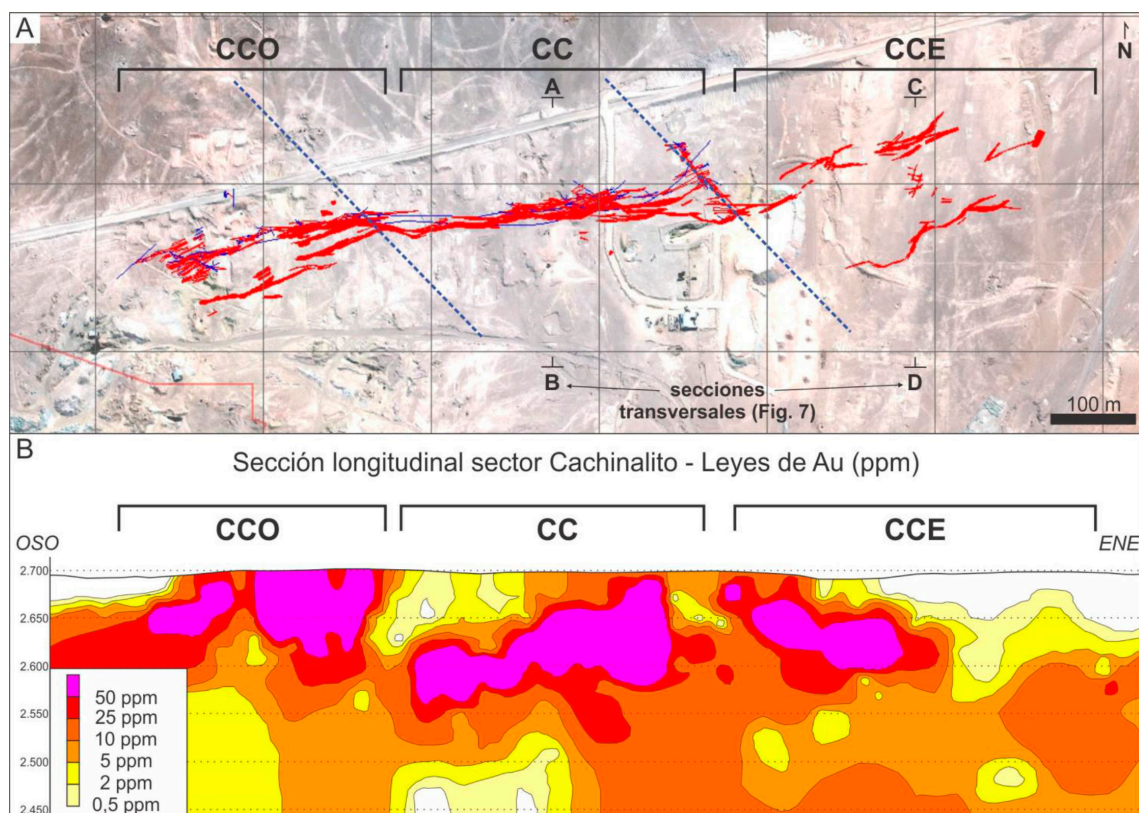


Fig. 4. A. Mapa de plantas integradas (niveles 2670 a 2550) de la estructura Cachinalito en donde se separan los sectores Cachinalito Central Oeste (CCO), Cachinalito Central (CC), Cachinalito Central Este (CCE). En rojo *ledges* mineralizados, en azul fallas posmineralización. B. Sección longitudinal del sector Cachinalito, se muestra la distribución de leyes de Au en ppm (Tomado de Galina, 2019). La distribución de las leyes de Au evidencia una clara zonación vertical de las concentraciones auríferas por metro de potencia de *ledge*. Se aprecia como los valores superiores a 25 ppm de Au x m de potencia ocupan la parte superior del depósito, entre las cotas 2.525 y 2.675 m s.n.m.

25 ppm/m de Au se encuentran agrupados entre las cotas 2.525 y 2.675 m s.n.m.

A partir de mapeos de *ledges* en los distintos niveles, secciones y la geoquímica de canaletas de interior mina (Figs. 5 y 6), se estableció una zonación de sectores de alta ley, las que se separaron en intervalos de 2 a 5 g/t de Au (clavos de alta ley) y >5 g/t de Au (clavos de muy alta ley) (Fig. 6A). Estos intervalos permiten definir los clavos mineralizados según su orientación, inclinación, longitud y espesor ($n=345$). Para la caracterización de los *ledges* de distintas orientaciones se midieron y analizaron variables como rumbo, inclinación, longitud y espesor (Fig. 5A; $n=142$). Posteriormente se realizó un análisis estadístico de los datos en ambos casos (Figs. 5B y 6B).

4.1. Sistema de *ledges*

El análisis estadístico de los *ledges* permitió visualizar el desarrollo de sus orientaciones principales: EO, ENE-OSO (incluyendo NE-SO) y en menor medida ONO-ESE (Fig. 5B). Los segmentos de *ledges* de mayor frecuencia son los de orientación EO, con rumbos que varían entre $N90^\circ$ y $N80^\circ$ (promedio $N89^\circ$). Se caracterizan por ser continuos, con espesores de hasta 12 m, pero con promedio de 3 m, e inclinaciones de más de 75° , generalmente al NO. La longitud de estos segmentos principales varía entre los 10 y 90 m, con un promedio de 36 m (Figs. 7 y 8). En el sector de Cachinalito Central (Figs. 7A y 8A a C) se puede reconocer que los *ledges* tienen una orientación dominante EO, pero

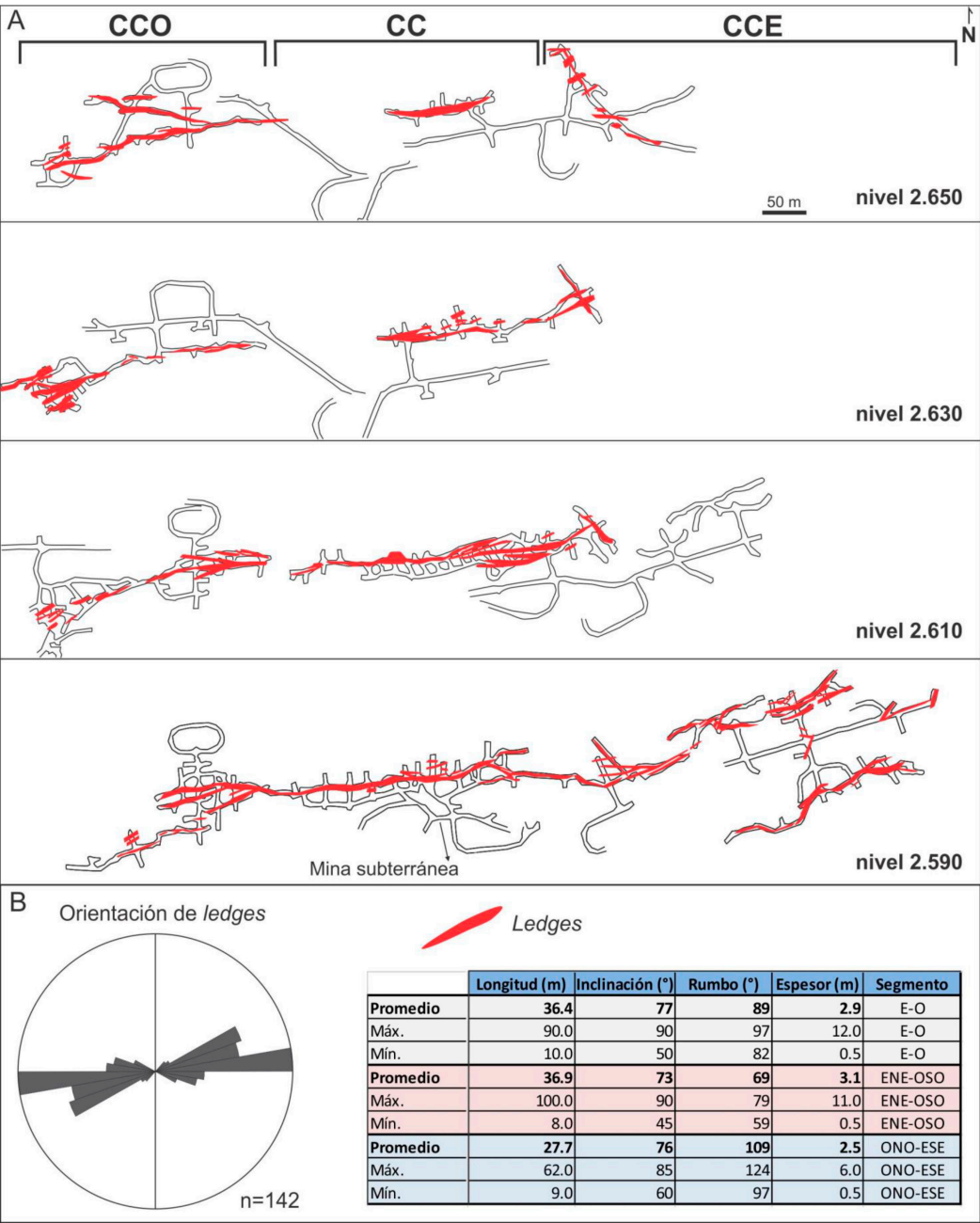


Fig. 5. A. Mapa de distribución de ledges en planta para los niveles 2650, 2630, 2610 y 2590 de la mina. B. Diagrama de rosas de orientación de segmentos de ledges, y tabla con las principales variables medidas en cada segmento.

internamente se encuentran segmentados con estructuras que van cambiando de orientación desde EO a ENE y localmente ONO (Fig. 8D y E). En los frentes de interior mina se observan algunos ledges con espesores cercanos a los 2 m acompañados en

su bordes por una zona constituida por delgados ledges subparalelos, junto con vetillas de óxidos de Fe supérgeno (Fig. 8F y G). Indicadores cinemáticos (estrías, corrugados y escalones) medidos en planos de los ledges EO muestran raques de alto ángulo ($>75^\circ$)

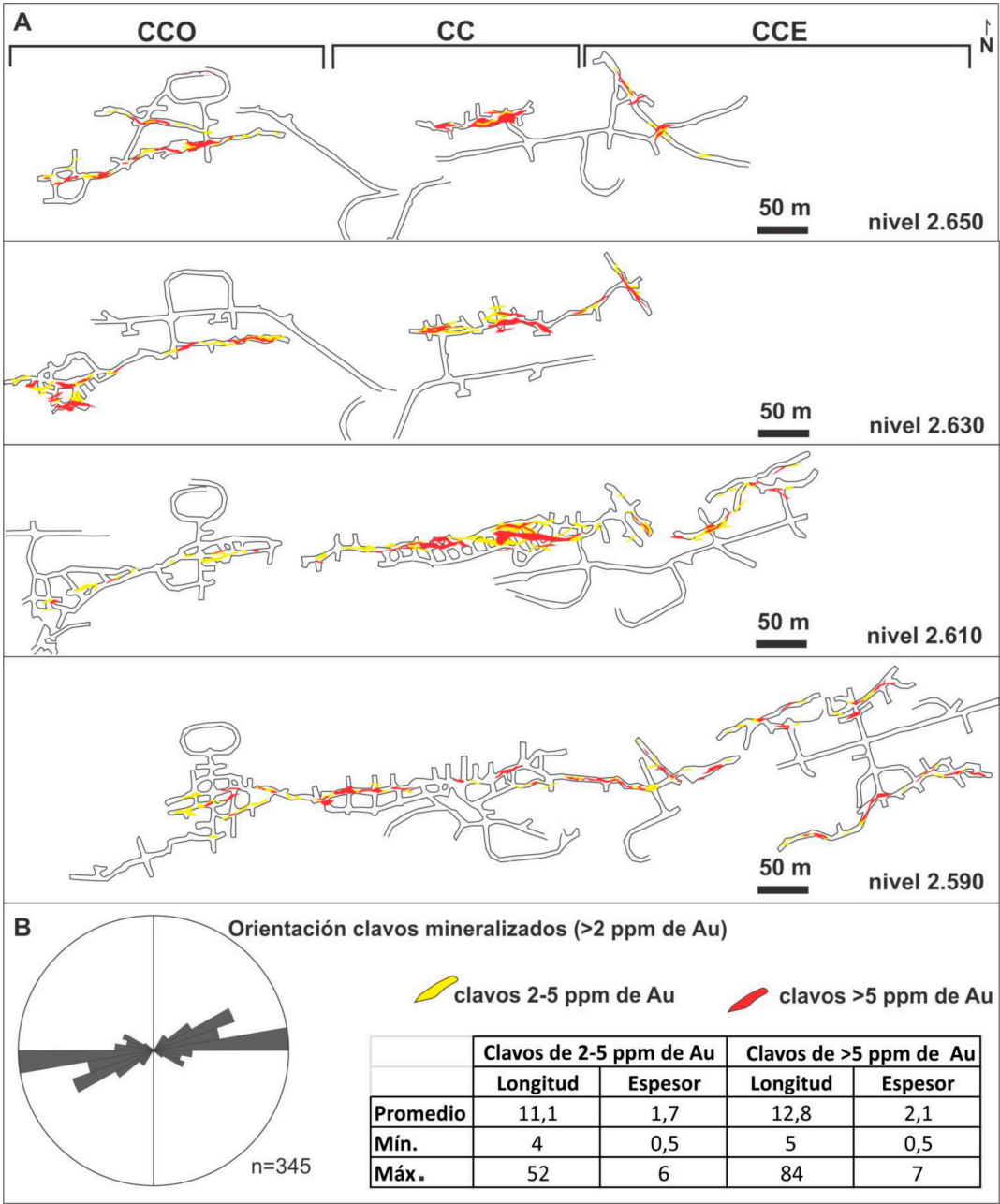


Fig. 6. **A.** Mapa de distribución en planta de clavos mineralizados identificados en cada *ledge*, diferenciados con base en sus contenidos de oro (niveles 2590, 2610, 2630 y 2650). La mayor concentración de clavos mineralizados se distribuye en el segmento correspondiente a Cachinalito Central. **B.** Diagrama de rosas de orientación de clavos mineralizados y tabla con las principales variables medidas en cada clavo.

con componente dextral, y un fuerte componente normal indicado por escalones estriados.

Los segmentos de *ledges* ENE presentan rumbos variables entre N60° y N80° con un promedio

de N70°. Estos segmentos forman estructuras más discontinuas respecto a los segmentos EO con bruscos cambios de espesor en el rumbo y en la inclinación. Presentan espesores entre 11 y 0,5 m (3 m promedio),

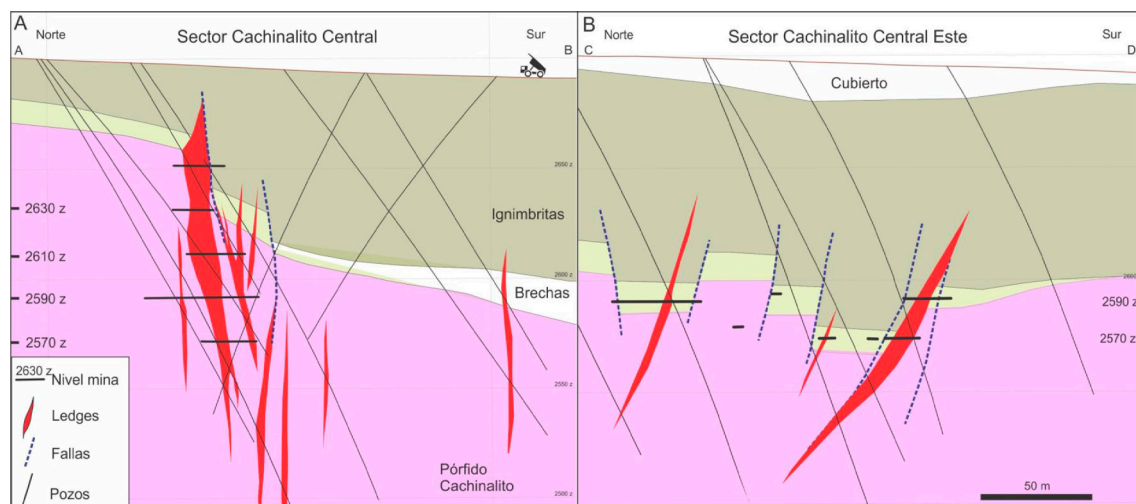


Fig. 7. Secciones transversales del sector Cachinalito. Ver ubicación en figura 4. **A.** Sección en el sector Cachinalito Central. **B.** Sección en el sector Cachinalito Central Este. En estas secciones se observa como los *ledges* cortan al Pórfido Cachinalito (dacita porfírica con fenocristales de plagioclasas, biotita, anfíbol, piroxeno y cuarzo), brechas piroclásticas líticas de matriz fina con fragmentos del Pórfido Cachinalito e ignimbritas con fragmentos pumíceos irregulares sin evidencias de soldamiento. El mayor desarrollo de espesor de los *ledges* se da principalmente en el Pórfido Cachinalito y disminuye hasta desaparecer en las ignimbritas. Además, se destaca la estrecha relación entre los *ledges* y las fallas normales (líneas cortadas azules), especialmente en Cachinalito Central.

longitudes de hasta 100 m, con un promedio de 37 m (Fig. 5B), e inclinación desde la vertical hasta los 45° al SE (Figs. 7 y 9). Las figuras 9D y E muestran la segmentación interna de estos 2 sectores, central este y central oeste, en donde se observa una mayor cantidad de *ledges*, pero más discontinuos y en general más cortos, y reducida representación de los tramos EO. Las estructuras en los frentes de interior mina muestran inclinaciones menores respecto a los segmentos EO, con valores de inclinación menores a 75° (Fig. 9E y F). Otra característica importante son los cambios abruptos en el espesor e inclinación de los *ledges*, que llegan en algunos casos a formar estructuras de pocos centímetros de espesor (Fig. 9F) o desaparecer por algunos centímetros a metros y se vuelven a desarrollar o terminan abruptamente (Fig. 9G). Los indicadores cinemáticos (estrías, corrugados y escalones) medidos sobre los *ledges* muestran raques con ángulos que varían entre 63 y 85° lo que indica un componente dextral algo más marcado que en los segmentos EO, pero también un importante componente normal.

Los *ledges* con orientación ONO (N109°) son escasos (Figs. 4, 8 y 9), se caracterizan por segmentos más cortos (27 m promedio) con menores espesores

(entre 0,5 y 6 m) e inclinaciones entre los 85° y 60° hacia el NE. Posterior a la mineralización se da el desarrollo de fallamientos de orientación NO-SE (Fig. 4) que afectan a los *ledges* mineralizados formando estructuras y cuerpos brechosos de caolinita, óxidos Fe-Mn, baritina, y clastos de *vuggy silica* y pulsos posteriores. Estas fallas desarrollan cuerpos brechosos con baja continuidad lateral y vertical, y se forman preferencialmente en los cruces con los *ledges* ENE-OSO y E-O. Este fallamiento presenta una leve cinemática dextral, pero no genera grandes desplazamientos (<5 m), tanto en la vertical como en la horizontal (Guido *et al.*, 2014; Galina, 2019).

4.2. Distribución de leyes

El análisis de distribución de las leyes, principalmente valores entre 2 y 5 g/t de Au y >5 g/t de Au, muestra la extensión y distribución de los clavos mineralizados dentro de los *ledges* (Figs. 5A y 6A). Los clavos muestran un mayor desarrollo en los segmentos de orientación EO, en segundo orden los clavos contenidos en los segmentos de orientación ENE y en menor proporción en los de

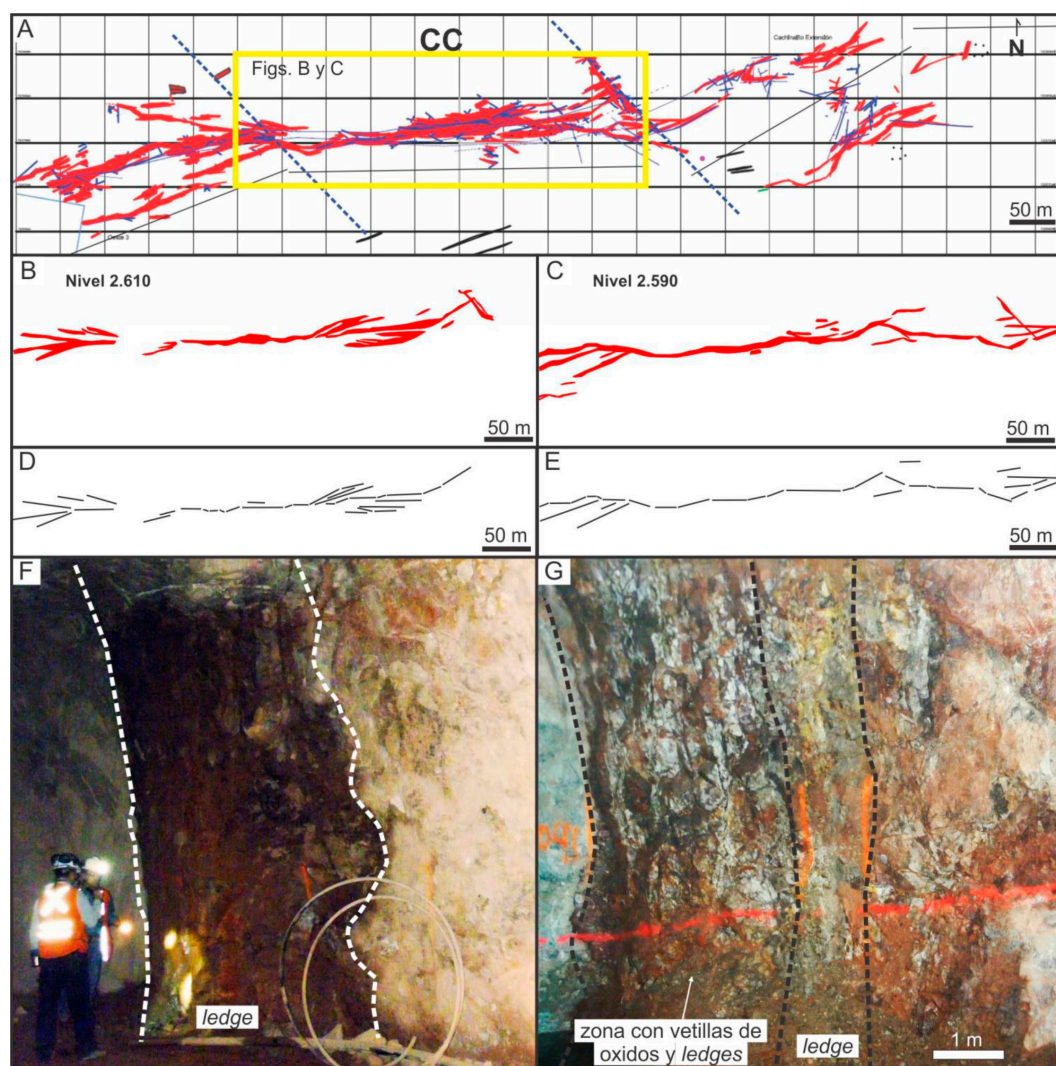


Fig. 8. A. Mapa de plantas integradas con la distribución de *ledges* y fallas en los diferentes niveles de la mina (niveles 2.670 a 2.550) del sector Cachinalito. Las líneas rojas representan los *ledges* y las líneas azules continuas fallas sin mineralización, mientras que las líneas azules cortadas fallas posmineralización. B-C. Sector Cachinalito Central (niveles 2.610 y 2.590), se muestran en detalle los *ledges*. D-E. Detalle de B y C que muestra los segmentos de *ledges* de distintas orientaciones. F-G. Ejemplos de *ledges* EO en Cachinalito Central (CC) donde se observan espesores mayores a 3 m e inclinaciones subverticales. En G se destaca la presencia del *ledge* principal, rodeado por una zona constituida por sectores con vetillas de óxidos de Fe y *ledges* delgados.

orientación ONO. Las leyes mayores a >5 g/t de Au se presentan principalmente en los tramos EO formando segmentos continuos con longitudes de hasta 84 m, con promedio de 13 m y espesores de hasta 7 m y promedio de 2,1 m.

Los sectores con leyes entre 2 y 5 g/t de Au son zonas aledañas a los clavos, >5 g/t de Au y se desarrollan en ambas orientaciones (EO y ENE). Son más frecuentes en la orientación ENE, formando

segmentos poco continuos y de poca longitud (longitud promedio de 11 m y espesor promedio de 1,7 m; Fig. 6A y B). En general forman halos alrededor de los sectores con leyes >5 g/t de Au.

5. Interpretación

El sistema de *ledges* del sector Cachinalito presenta una morfología discontinua, de orientación

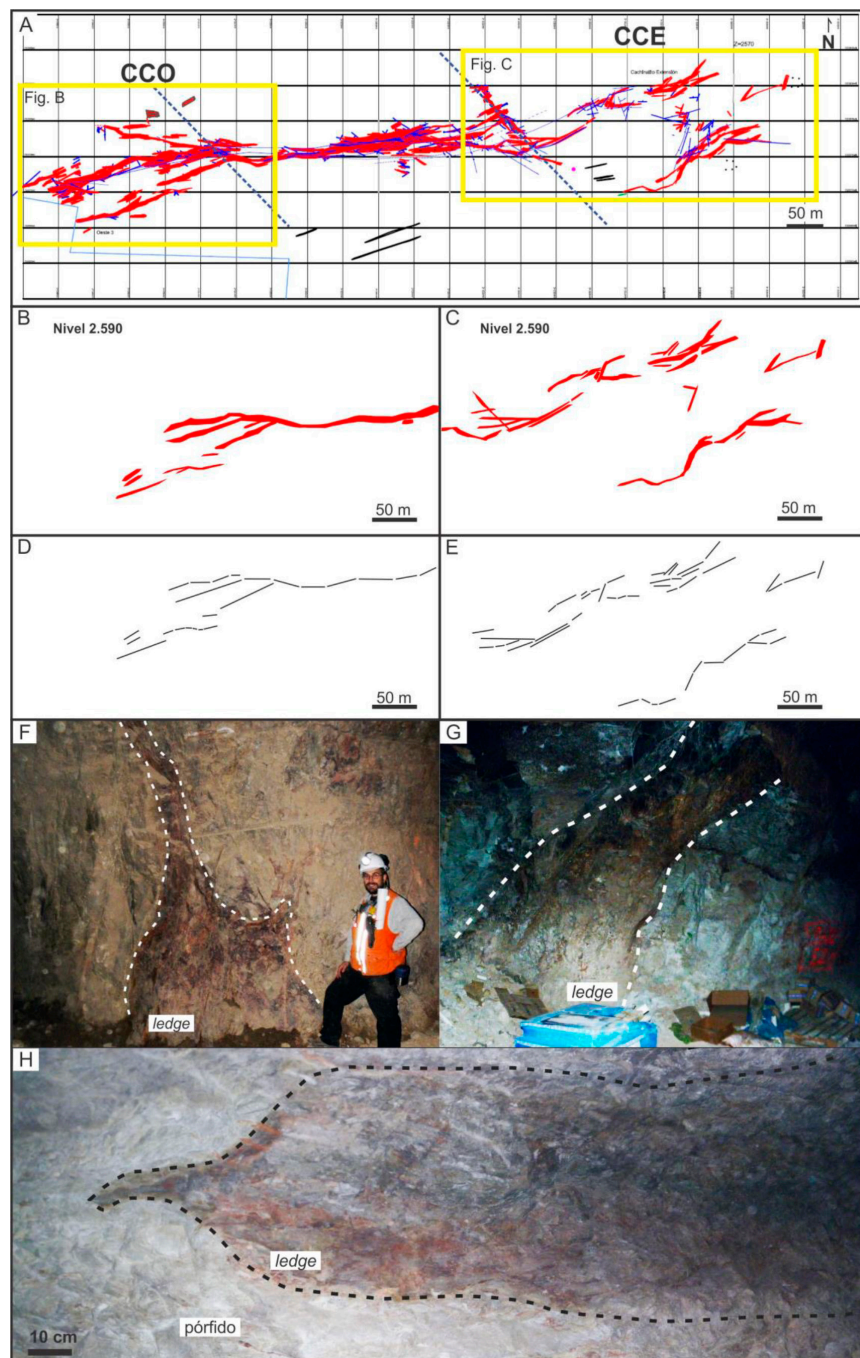


Fig. 9. A. Mapa de plantas integradas (niveles 2.670 a 2.550) del sector Cachinalito que muestran la distribución de *ledges* y fallas en los diferentes niveles de la mina. Las líneas rojas representan los *ledges* y las líneas azules continuas representan fallas sinmineralización, mientras que las líneas azules cortadas fallas posmineralización. B-C. Detalle de los sectores Cachinalito Central Oeste (CCO) y Cachinalito Central Este (CCE), nivel 2.590, se muestra detalle de los *ledges*. D-E. Detalle de B y C, se muestran los segmentos de *ledges* de distintas orientaciones. F-G. Ejemplos de *ledges* ENE en Cachinalito Central Este (CCE) donde se observan cambios abruptos de espesor y morfología y una menor inclinación respecto a los *ledges* del sector Cachinalito Central. H. Vista hacia el techo de un nivel de la mina donde se observa un *ledge* con un abrupto cambio de espesor y terminación de la estructura.

general ENE-OSO, conformada por tramos que cambian abruptamente de dirección, espesor, longitud y/o inclinación en pocos metros de corrida. Ellos definen una estructura sigmoidal, generada a partir del crecimiento de fallas por donde circularon los fluidos hidrotermales responsables de la génesis del yacimiento. De acuerdo con los antecedentes de campo (Figs. 4 y 7), la distribución espacial de los *ledges* está directamente asociada con las fallas y fracturas (Fig. 4). Las relaciones de corte entre las fallas, rocas de caja (56-52 Ma) y edad de la actividad hidrotermal (43-49 Ma) permiten sugerir la contemporaneidad entre la actividad de las fallas y el proceso mineralizador. En este contexto, estas estructuras habrían canalizado la circulación de los fluidos hidrotermales y, al mismo tiempo, habrían continuado su actividad tectónica durante la formación del yacimiento, como queda registrado en los indicadores cinemáticos presentes en los *ledges*, situación ampliamente documentada para este tipo de depósito (Cox *et al.*, 2001; Nelson, 2006).

La zonación vertical observada en la distribución de leyes en la sección longitudinal del depósito (Fig. 4B), con las zonas de muy alta ley (>25 ppm de Au) ubicadas en la parte alta del yacimiento (por encima de la cota 2.500 m s.n.m.), sugiere una morfología subhorizontal de los clavos mineralizados al interior de los *ledges* y al mismo tiempo pueden representar la zona de precipitación del Au originada durante un proceso de ebullición (Cox *et al.*, 2001; Nelson, 2006).

A partir de los datos y características de los *ledges* es posible generar un modelo estructural general sinmineralización, en donde las estructuras EO podrían constituir fracturas secundarias asociadas al movimiento extensional-dextral de las fallas NE, generando fracturas tensionales de rumbo EO (Fig. 10A y B). Los segmentos ONO podrían corresponder a fallas conjugadas de las ENE con un menor desarrollo en el sistema estructural. Los segmentos ENE muestran morfologías de los *ledges* más discontinuas y mayor cantidad de los mismos con menores espesores, en comparación con los segmentos EO, situación compatible con los movimientos experimentados por las fallas ENE a lo largo de las cuales se emplazaron estos *ledges*. Las estructuras EO representan fallas tensionales, con morfología lenticular, que se adelgazan a medida que se acercan a los segmentos ENE, lo que permite un mayor desarrollo de los *ledges* en el sector

central de la fractura (Fig. 10B). Los segmentos ENE podrían haber actuado como conectores o zonas de transferencia entre los segmentos EO, mostrando una menor inclinación y pasando de una estructura continua a varias estructuras o ramas más pequeñas (menor espesor) y discontinuas (Fig. 10B y C). A partir de estas observaciones se interpreta que la cinemática sinmineralización presentó los máximos esfuerzos (sigma 1) con una orientación EO, y los esfuerzos mínimos (sigma 3) con una orientación N-S (Fig. 10B y C), lo que generó estructuras tensionales EO, estructuras extensionales-dextrales de rumbo ENE a NE y estructuras extensionales-sinestrales de orientación ONO.

El análisis de la distribución de leyes permitió visualizar los tamaños, continuidad y grado de conexión que presentan los clavos mineralizados dentro de los *ledges*, así como dimensionar los sectores mineralizados de alta y baja ley. La distribución y morfología de los clavos mineralizados muestran su mayor desarrollo y altas leyes en los segmentos de *ledges* EO, con gran cantidad de sectores con valores >5g/t de Au, y que coinciden con los mayores espesores, ambos (espesores y leyes) disminuyen hacia los segmentos ENE (Fig. 6). En los segmentos de *ledges* ENE se desarrollan principalmente clavos con leyes entre 2 y 5 g/t de Au y en menor medida clavos con contenidos >5g/t de Au, mientras que los *ledges* de orientación ONO presentan ambos clavos (2 y 5 g/t de Au y >5g/t de Au), pero de menores dimensiones que en los anteriores.

6. Consideraciones finales

El análisis de leyes, el mapeo de detalle realizado a escala de yacimiento y la identificación de estructuras individuales muestra que uno de los factores importantes en la formación del depósito de oro El Guanaco es el control estructural. El entendimiento del control estructural a escala del yacimiento y del sistema de estructuras mineralizadas (*ledges*) permite visualizar las distintas segmentaciones dentro de una estructura general, teniendo en cuenta los tamaños, continuidad horizontal y vertical, grado de conexión entre segmentos de distintas orientaciones, así como determinar las orientaciones con mayor desarrollo de estructuras mineralizadas. El conocimiento detallado de la

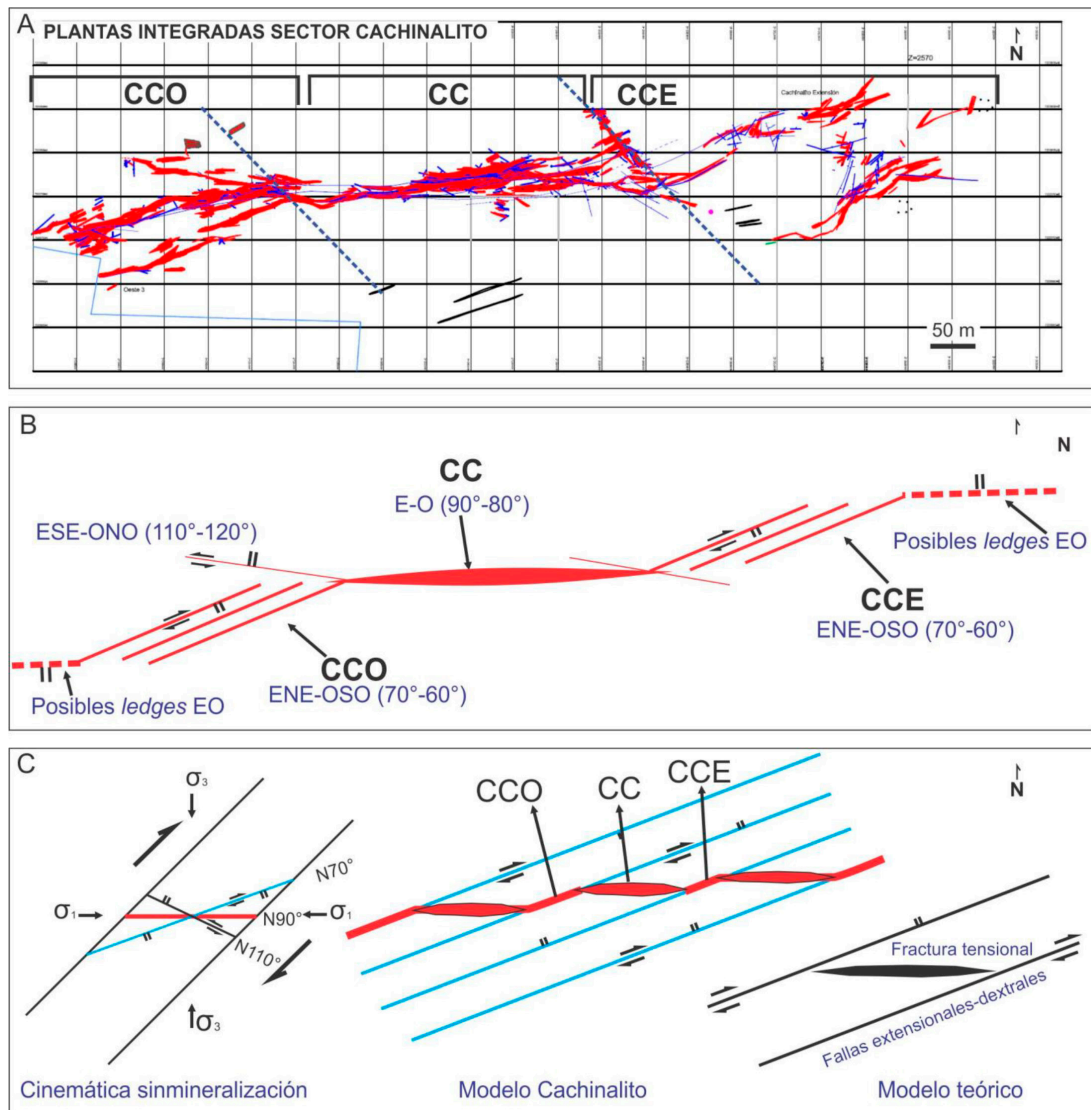


Fig. 10. **A.** Mapa de plantas integradas (nivel 2.670 a 2.550) del sector Cachinalito. **CCO**: Cachinalito Central Oeste, **CC**: Cachinalito Central, **CCE**: Cachinalito Central Este. Las líneas rojas representan los *ledges* y las líneas azules continuas fallas sinmineralización, mientras que las líneas azules cortadas fallas posmineralización. **B-C.** Modelo estructural general para Cachinalito e interpretación de la cinemática y esfuerzos sinmineralización. Ver texto para explicación.

distribución de las leyes permite caracterizar e identificar los clavos mineralizados dentro de cada *ledge*, e interpretar las posibles vías de ascenso de los fluidos mineralizadores y dimensionar y separar los sectores mineralizados de alta y baja ley. Este tipo de análisis e identificación de los clavos mineralizados representa una importante herramienta que ayuda a orientar mejor los sondeos de exploración y/o de producción en este tipo de depósitos.

Agradecimientos

Se desea agradecer a la empresa Austral Gold Ltd. por permitir la publicación de este trabajo y a los geólogos C. Mendiz, C. Peralta, F. Heit, J. Osorio y R. Sánchez. También se agradece especialmente a los evaluadores Dr. H. Lledó y Dr. J. Skármeta y principalmente al editor Dr. W. Vivallo por las beneficiosas y acertadas sugerencias y correcciones realizadas, las cuales han mejorado sustancialmente el trabajo.

Referencias

- Arribas, A. 1995. Characteristics of high-sulfidation epithermal deposits, and their relation to magmatic fluid. *In* Magmas, Fluids, and Ore Deposits (Thompson, J.F.H.; editor). Mineralogical Association of Canada Short Course 23: 419-454.
- Chong, G. 1973. Reconocimiento Geológico del área Catalina-Sierra de Varas y estratigrafía del Jurásico del Profeta, provincia de Antofagasta. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología: 284 p.
- Cox, S.F.; Knackstedt, M.A.; Braun, J. 2001. Principles of structural control on permeability and fluid flow in hydrothermal systems. *In* Structural Controls on Ore Genesis (Richards, J.P.; Tosdal, R.M.; editors). Reviews in Economic Geology 14: 1-24.
- Egaña, S.P. 1978. Geología, Alteración, Mineralización y Prospección del Yacimiento El Guanaco, II Región. Informe Interno (Inédito), Empresa Nacional de Minería: 46 p.
- Espinoza, F.; Matthews, S.; Cornejo, P.; Venegas, C. 2011. Carta Catalina, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 129: 63 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Galina, M. 2019. Geología y Metalogénesis del depósito epitermal de alta sulfuración El Guanaco, Desierto de Atacama, Chile. Tesis doctoral (Inédito), Universidad Nacional de La Plata: 194 p. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/81228>.
- Galina, M.; Guido, D.; Jovic, S.; Peralta, C.; Kasaneva, S. 2014. Historia Productiva del Yacimiento aurífero El Guanaco, Desierto de Atacama, Chile. *In* Congreso Geológico Argentino, No. 19, Asociación Geológica Argentina, Actas (CD-ROM). Córdoba.
- García, F. 1967. Geología del Norte Grande de Chile. *In* Symposium sobre el Geosinclinal Andino, Sociedad Geológica de Chile 3: 138 p.
- Guido, D.; Jovic, S.; Galina, M.; Peralta, C.; Mendiz, C.; Sastre, L.; Kasaneva, S. 2014. Caracterización del depósito epitermal de alta sulfuración El Guanaco, Antofagasta, Chile. *In* Congreso Geológico Argentino, No. 19, Asociación Geológica Argentina, Actas (CD-ROM). Córdoba.
- Hedenquist, J.W.; Arribas, A.; González-Urrien, E. 2000. Exploration for epithermal gold deposits. *In* Gold in 2000 (Hagemann, S.G.; Brown, P.E.; editors). Reviews in Economic Geology 13: 245-277.
- Matthews, S.; Cornejo, P. 2006. Geología del área de Guanaco-Inesperada, II Región. Informe Interno (Inédito), Guanaco Compañía Minera Ltda.: 21 p.
- Nelson, E.P. 2006. Drill-hole design for dilational ore shoot targets in fault-fill veins. *Economic Geology* 101 (5): 1079-1085.
- Puig, A.; Díaz, S.; Cuitiño, L. 1988. Sistemas hidrotermales asociados a las calderas en el Arco Volcánico Paleógeno de la Región de Antofagasta, Chile: Distritos El Guanaco, Cachinal de la Sierra y El Soldado. *Revista Geológica de Chile* 15 (1): 57-82. doi: 10.5027/andgeoV15n1-a05.
- Richards, J. 2003. Tectono-Magmatic Precursors for Porphyry Cu-(Mo-Au) Deposit Formation. *Economic Geology* 98: 1515-1533.
- Vikre, P.G. 1989. Ledge formation at the Sandstorm and Kendall gold mines, Goldfield, Nevada. *Economic Geology* 84: 2115-2138.